

УДК 622.673.1: 681.514.54

## ДАТЧИКИ УСКОРЕНИЙ В МОБИЛЬНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

<sup>1</sup> Б.В.Копей, <sup>2</sup> Ю.А.Бобошко, <sup>3</sup> В.В.Лопатин, <sup>1</sup> И.Б.Копей

<sup>1</sup> ИФНТУНГ, 76019, Ивано-Франковск, ул. Карпатская, 15, тел. (03422) 40534,  
koreyb@nuing.edu.ua

<sup>2</sup> ДК „Укргаздобыча”, Киев, ул. Кудрявская, 38, тел. (044) 4612954  
boboshko@gasdob.com.ua

<sup>3</sup> ИИГТМ НАН Украины, Днепрпетровск, ул. Симферопольская, 2, тел. (056) 3707782  
igtm@ua.fm

*Изложено результаты исследований и практический опыт работы датчиков ускорений мобильной измерительной аппаратуры, которая может быть использована для оценки вибронегруженности промышленных компрессоров, шахтных подъемных комплексов или штанговых скважинных насосных установок – ШСНУ.*

*The results of researches and practical experience of accelerations transducers for mobile measuring systems, which can be used for estimation of industrial compressors vibrations, mine lifting complexes or pumping units.*

Вибрации движущихся частей компрессора являются причиной выхода со строя отдельных деталей, ответственных за надежность конструкции. Возникающее при этом нагрузки ускоряют износ и усталостное разрушение несущих деталей. В ШСНУ виброускорения дополнительно нагружают основные узлы (редуктор, четырехзвенный преобразовательный механизм, колонну насосных штанг, скважинный насос и т.п.). Поперечные колебания движущегося подъемного сосуда являются основной причиной горизонтальных нагрузок на элементы жесткой армировки шахтного ствола. Причем случайное внешнее возбуждение системы "подъемный сосуд – жесткая армировка" характеризуется наличием переменных по глубине ствола кинематических зазоров между контактными поверхностями проводников и направляющих устройств подъемного сосуда. Случайный пространственный характер колебательного процесса в значительной степени определяется случайным характером монтажных отклонений проводников, а развитие его во времени – эксплуатационными отклонениями проводников, нарастающими в результате их износа, коррозии и появления остаточных деформаций в системе "подъемный сосуд – жесткая армировка". Фактическое определение величины нагрузок в шахтных стволах, в промышленных компрессорах или в ШСНУ невозможно без детального исследования динамических процессов с помощью мобильных информационно-измерительных системных комплексов (МИИСК). Подобные системы МИИСК были созданы и применяются в Институте геотехнической механики НАН Украины им. Н.С. Полякова (ИГТМ) и ИФНТУНГ с 1990-х годов [1-3]. Практическая реализация возможностей МИИСК, как известно, существенно ограничивается номенклатурой и техническими параметрами используемых датчиков и других измери-

тельных устройств. Практика показала, что измерение линейных ускорений с помощью съемных датчиков-акселерометров в промышленных или шахтных условиях экономически, организационно и технически существенно проще, чем непосредственное измерение контактных усилий взаимодействия с помощью тензометрических башмаков. Однако даже при наличии самых совершенных ПЭВМ и интерфейсов без надежных отвечающих современным требованиям датчиков (акселерометров) МИИСК будет малоэффективна. Можно утверждать, что именно уровень акселерометров определяет уровень МИИСК. Известно, что для правильного выбора первичного акселерометра, не искажающего форму и параметры ударного воздействия, необходимо учитывать нелинейность амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик, динамический и частотный диапазон акселерометра. При этом основным требованием к частотной характеристике усилительно-измерительного тракта МИИСК является ее растянутость в сторону низких частот. Идеальным является, когда нижняя граница частотной характеристики МИИСК начинается с нуля. Практически расширение частотного диапазона в сторону низких частот обеспечивается увеличением входного сопротивления усилительно-измерительного тракта, уменьшением емкости соединительного фидера (кабеля) и акселерометра МИИСК. Оценить искажения, вносимые МИИСК в полезный сигнал, можно, например, по коэффициенту  $P$ .

$$P=2\pi(C_m+C_\phi+C_a)\cdot R\cdot\tau^{-1},$$

где:  $C_m$  – входная емкость усилительно-измерительного тракта МИИСК,  $C_\phi$  – емкость соединительного фидера,  $C_a$  – емкость акселерометра,  $R$  – входное сопротивление (импеданс) МИИСК,  $\tau$  – длительность измеряемого ударного воздействия. Видно, что искажения

(см. табл. 1) существенно зависит от соотношения постоянной времени  $T=(C_m+C_\phi+C_a)\cdot R$ .

**Таблица 1 — Значения погрешностей искажения амплитуды и длительности ускорения**

$P$	Абсолютная погрешность амплитуды ускорения в %	Абсолютная погрешность длительности ускорения в %
1	60	28
2	48	23
5	20	11
10	11	6
20	6	4
50	3	2

Реально МИИСК искажает не только пиковое значение полезного сигнала, но и длительность измеряемого ударного воздействия, т.к. выходной сигнал быстрее достигает нулевого значения. Причем уменьшение пикового значения ударного воздействия сопровождается отрицательным выбросом, равным уменьшению пикового значения ударного воздействия при условии завала низкочастотной характеристики МИИСК по классическому закону RC-цепи (около 6 дБ/окт). Понятно, что ошибка измерения зависит от формы ударного воздействия. Так, например, чтобы ошибка измерения амплитуды прямоугольного ударного воздействия была не более 5%, отношение  $(C_m+C_\phi+C_a)\cdot R\cdot\tau^{-1}$  должно быть больше 20. Таким образом, постоянная времени МИИСК должна быть в 20 раз больше измеряемого ударного воздействия (импульса ускорения). Из тринадцатилетнего практического применения МИИСК [1-3] можно утверждать, что для любых форм импульсов ускорения измерение их параметров с погрешностью 5% обеспечивается при  $(C_m+C_\phi+C_a)\cdot R\cdot\tau\geq 10$ . В ряде задач при измерении ударных воздействий «подъемный сосуд – жесткая армировка» достаточно знать пиковое значение ударного ускорения. Однако этой информации явно недостаточно для полного описания движения, вызванного ударом. Только в некоторых случаях ударное воздействие «подъемный сосуд – жесткая армировка» можно рассматривать как классический удар, сводящийся к «мгновенному» изменению скорости или приложению «мгновенных» сил и моментов к подъемному сосуду. В этих случаях  $X(t)=\Delta\zeta\cdot a(t)$ , где  $X(t)$  – ударное воздействие,  $\Delta\zeta$  – приращение скорости, импульса силы или момента сил за время удара,  $a(t)$  – мгновенное ускорение. Использование такого представления допустимо лишь в тех случаях, когда продолжительность удара существенно меньше наименьшего из периодов собственных колебаний подъемного сосуда. В остальных случаях необходимо учитывать «форму удара», которая обычно определяется непосредственными скважинными или шахтными измерениями, т.к. при этом часто ударные явления сопровожда-

ются возникновением колебаний конструкции ШСНУ, промышленного компрессора или подъемного сосуда и возбуждением вибрационных воздействий. Поэтому необходимо рассмотреть вопрос о фазовых искажениях МИИСК при измерении ударных процессов в ШСНУ, компрессоре или системе «подъемный сосуд – жесткая армировка». Сам накопительно-обрабатывающий блок МИИСК не вносит фазовых искажений полезного сигнала. Однако, инструментальный усилитель, стоящий после первичного преобразователя акселерометра, может быть источником значительных фазовых искажений полезного сигнала, вызванного ударом. Особенно сильны эти искажения на нижней и верхней границах частотного диапазона инструментального усилителя. С достаточной для практики точностью можно считать, что фазо-частотная характеристика инструментального усилителя линейна лишь в диапазоне от  $f_1=5\cdot 10f_{нч}$  до  $f_2=0,1f_{вч}$ , где  $f_{нч}$  и  $f_{вч}$  – нижняя и верхняя границы рабочего частотного диапазона инструментального усилителя. Например, у реостативного датчика типа МП верхняя граница 30 Гц. Именно по вышеизложенным причинам нами в МИИСК используются конверсионные датчики типа МП-95 [4], которые, в силу особенностей государственной концепции и специфики аэрокосмического направления, проектировались и создавались на грани технических возможностей, поэтому наиболее полно отвечают экстремальным промышленным или шахтным условиям (рис. 1).



**Рисунок 1 — Штатный акселерометр МП-95 МИИСК**

Однако современные акселерометры, немного уступая им по надежности, имеют при этом значительно меньшую стоимость. Для оптимального выбора и обеспечения целесообразности использования имеющихся на рынке Украины иногда весьма дорогих акселерометров, наряду со знанием специалистов, что и как измерять в компрессоре, ШСНУ или на подъемном сосуде, необходим также и опыт эксплуатации МИИСК, а также учет возможности современных акселерометров. Цель статьи – оказать помощь в этом отношении. Мировая промышленность изготавливает большое раз-

Таблица 2 — Сравнительные характеристики акселерометров

Типы	Точность в %	Особенности	Средняя цена в у.е.
Электромеханические (струнные, маятниковые)	0,01-2,00	Обеспечивают низкие частоты	1000
Пьезоэлектрические	0,1 -5,0	Только для переменных ускорений	750
Пьезорезистивные	1,0-10	Сложная настройка, низкая термо- стабильность	450
Интегральные объемной конструкции	1,0-10	Низкий шум, сложная настройка	250
Интегральные поверхно- стной конструкции	2-20	Малые габариты, завершенные кон- струкции	25
Пьезопленочные	10-30	Только для переменных ускорений, чувствительны к температуре и дав- лению	5

нообразие акселерометров, имеющих различные принципы действия, диапазоны измерения ускорений, массу, габариты, цены (табл. 2).

Об электромеханических, пьезоэлектрических и пьезорезистивных акселерометрах существует достаточно информации и публикаций. Поэтому рассмотрим современные интегральные акселерометры: пьезопленочные, объемные и поверхностные. В настоящее время произошла буквально техническая революция - в области механических инерциальных датчиков (акселерометров) стала доминировать микроэлектромеханическая технология (MEMS). Технология MEMS подразумевает изготовление на кристалле кремния микроскопически подвижных элементов и при совмещении с микроэлектронными технологиями позволяет создать очень компактные, надежные, простые с точки зрения применения датчики и не просто акселерометры, а «системы на кристалле» высокой степени интеграции.

Типичным пьезопленочным акселерометром является АСН-01 компании Atochen Sensors, выполненный на основе многослойной пьезоэлектрической полимерной пленки. Конструктивно многослойная пленка этого акселерометра закреплена на подложке из окиси алюминия, и к ней присоединена инерционная масса из порошкового металла. При ускорении (изменении скорости движения датчика) в результате действия инерционных сил происходит деформация пьезоэлектрической полимерной пленки. В результате возникает пьезоэффект – разность потенциалов на границах слоев пленки, пропорциональная линейному ускорению акселерометра. Для измерения переменного ускорения на низкой частоте в акселерометре имеется встроенный усилитель напряжения, который представляет собой полевой транзистор с малым током затвора. Это необходимо, т.к. многослойная пьезоэлектрическая пленка (чувствительный элемент датчика) обладает высоким выходным сопротивлением. Датчики этого типа нечувствительны к воздействиям постоянных ускорений и гравитационных сил, обладают самой низкой стоимостью,

поэтому могут широко использоваться в нефтяной и горной промышленности, например, в системах безопасности, в МИИСК и других измерительных системах, где требуемая точность не превышает 10%. Технологически это легко осуществить наклейкой акселерометра на исследуемую конструкцию, например, на корпус редуктора станка-качалки или на предохранительный башмак подъемного сосуда. В качестве недостатков акселерометров этого типа следует отметить отсутствие самоконтроля, чувствительность к изменению температуры и давления, существенный разброс характеристик.

Представительным примером объемного интегрального акселерометра может служить NAC -201/3 фирмы Lucas Nova Sensor. Конструктивно этот датчик состоит из 2-х сплавленных друг с другом пластин кремния. Инерционная масса акселерометра соединена кемневой рамкой и тремя тонкими кремневыми балками, каждая из которых содержит пару имплантированных пьезорезисторов, образующих полумост. В акселерометре полумосты соединены в классический мост Уитстона. При наличии линейного ускорения инерционная масса, изменяя свое положение в пространстве, вызывает деформацию пьезорезисторов. В зависимости от величины линейного ускорения электронная схема обработки акселерометра создает полезный выходной сигнал напряжением 50-100 мВ. Акселерометр снабжен системой самоконтроля. Самоконтроль осуществляется резистором – возбудителем, который нагревается при пропускании через него тестового электрического импульса. При нагревании, поскольку температурный коэффициент расширения кремния положителен, происходит прогибание балки и, следовательно, отклонение инерционной массы акселерометра. Таким образом полностью имитируется реальное ускорение и осуществляется объективный самоконтроль акселерометра. Акселерометр типа NAC -203 позволяет произвести лазерную подстройку его чувствительности и температурной коррекции под конкретную задачу исследования в горной промышленности в широких пределах. Акселе-

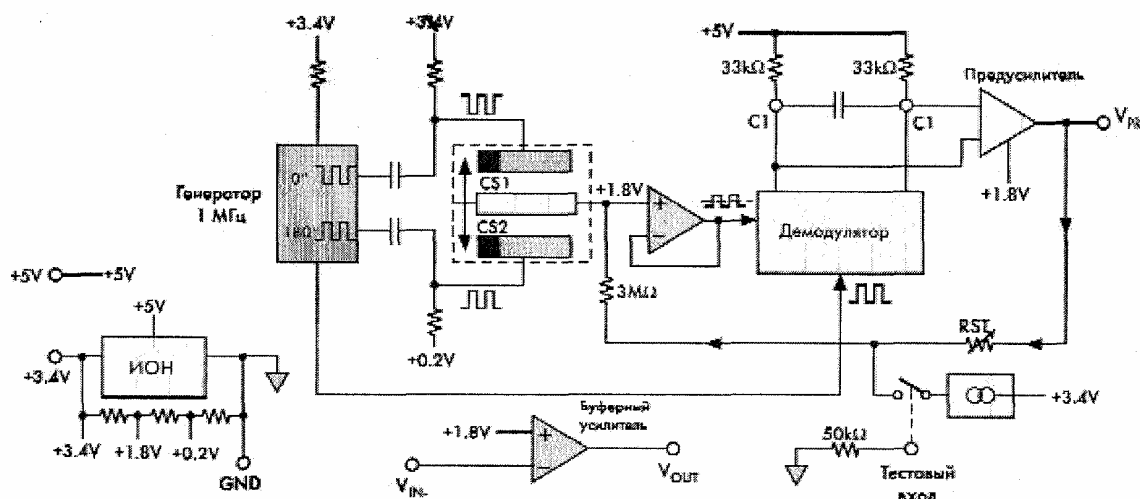


Рисунок 2 — Функциональная схема семейства акселерометров ADXLxxx

рометр типа NAC -201 допускает в определенных пределах реализацию коррекции параметров непосредственно исследователем. Выходное сопротивление этих акселерометров – 2 кОм, резонансная частота – не менее 10кГц, полоса пропускания по уровню 3дб составляет 500Гц, что с запасом перекрывает требования для акселерометров МИИСК. Акселерометры этого типа чувствительны к воздействию постоянных ускорений и гравитационных сил, поэтому допускают работу как в статическом, так и динамическом режиме. Данные акселерометры могут использоваться в системах, где к надежности показаний акселерометра предъявляются жесткие требования, исключающие ложное срабатывание.

В 1991 году компания Analog Devise выпустила первый поверхностный интегральный акселерометр ADXL50 [5] из семейства акселерометров ADXLxxx поверхностной конструкции (рис. 2).

Конструктивно чувствительный элемент акселерометра представляет собой дифференциальную конденсаторную структуру с воздушным диэлектриком. Инерционная масса при наличии ускорения смещается относительно остальной части кристалла поликремниевой пленки датчика, образует подвижную обкладку конденсатора переменной емкости. Удерживающие на весу инерционную массу растяжки, являются механическими пружинами постоянной упругости, ограничивающими перемещение пробной массы и ее возврат в исходное положение. Акселерометр является, по сути, современным аналогом МП-95, т.е. сила инерции при воздействии ускорения уравнивается упругой силой пружины  $F=kx$ , где  $k$  – жесткость пружины растяжки инерционной массы;  $x$  – перемещение инерционной массы  $m$  относительно исходного состояния. Отсюда следует, что линейное ускорение  $a=x(k/m)$ , причем  $k/m$  – характеристический (конструктивный) параметр акселерометра.

Набор неподвижных обкладок конденсатора, электрически соединенных, образуют две пары независимых конденсаторов, подвижная обкладка которых образована всей совокупностью пальцеобразных выступов инерционной массы. При ускорении подвижные пальцы инерционной массы приближаются к одному из наборов неподвижных пальцев и удаляются от другого, т.е. емкости между подвижной и неподвижными обкладками изменяются.

Рассмотрим работу акселерометра ADXL50. На верхнюю и нижнюю обкладки от генератора подаются прямоугольные противофазные сигналы одинаковой амплитуды частотой 1 МГц. При отсутствии ускорения, как было сказано выше, благодаря одинаковым расстояниям между обкладками, емкости будут одинаковы, следовательно, на подвижную обкладку передаются сигналы одинаковой амплитуды. Поступающий на вход повторителя разностный сигнал равен нулю. Понятно, что при линейном ускорении амплитуда разностного сигнала будет пропорциональна его величине, а фаза определяется знаком ускорения. Это осуществляется фазочувствительным демодулятором, преобразующим разностный сигнал в низкочастотный (полосой от 0 до 1000Гц), характеризующий величину и знак ускорения. Для уменьшения влияния временных изменений параметров, снижения нелинейности переходной характеристики акселерометра, влияния температуры окружающей среды используется отрицательная обратная связь (полная аналогия демпфированию в МП-95) по положению инерционной массы. Как видно из схемы, напряжение с выхода предусилителя через резистор подается на подвижные обкладки акселерометра, которые стремятся установить инерционную массу в исходное состояние.

Однако, с целью снижения стоимости, повышения экономичности, увеличения размаха выходного напряжения и чувствительности в более поздних моделях ADXLxxx компания Analog Devise отказалась от обратной связи,

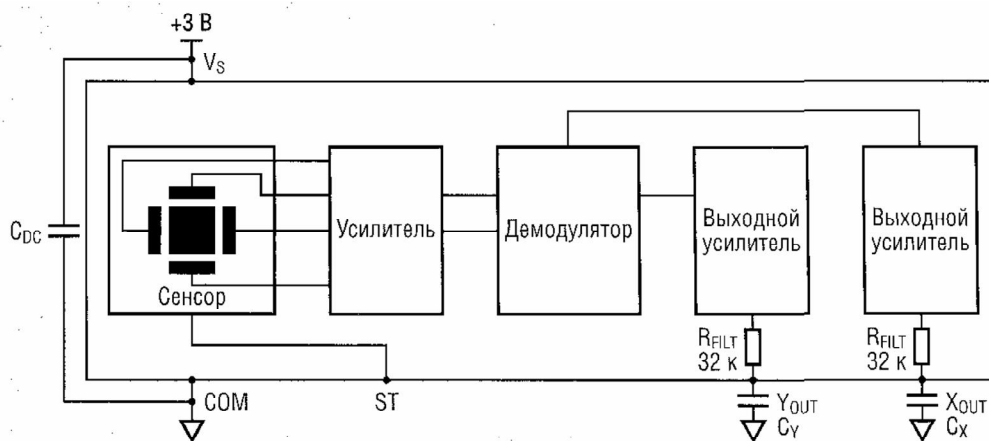


Рисунок 3 — Функциональная схема акселерометра ADXL320

что привело к реальному ухудшению линейности акселерометров.

Система самотестирования акселерометров типа ADXLxxx осуществляется подачей тестового сигнала на подвижную обкладку акселерометра. Это вызывает колебание инерционной массы, аналогичные тем, которые вызываются воздействием инерционных сил. Выходное напряжение акселерометра также будет изменяться с той же частотой. Таким образом проверяется комплексная (полная) работоспособность акселерометра. Возможно включение акселерометров типа ADXLxxx по логометрической схеме, тогда выходное напряжение будет пропорционально произведению линейного ускорения на напряжение питания. В этом случае снижается требование к стабильности источника электропитания.

Может быть очень интересным для исследований в нефтяной или горной промышленности двухосные акселерометры, например, для определения местоположения бура при бурении скважин. Из упрощенной блок-схемы типового двухосного акселерометра типа ADXL202 видно, что выходным сигналом акселерометра являются импульсы, относительная длительность которых пропорциональна ускорению. Например, ускорение в единицах  $g$  (здесь и далее  $g$  обозначает ускорение свободного падения  $9,81 \text{ м/с}^2$ ,  $mg$  соответственно равно  $1/1000 g$ ) рассчитывается по формуле  $a(g) = (T_1/T_2 - 0,5)$ . Относительная длительность 0,5 соответствует нулевому ускорению. Это обеспечивает повышенную помехоустойчивость, передачу сигнала по одной линии и обработку его данных любым микроконтроллером, имеющим только таймер (без аналого-цифрового преобразователя), например, на базе АПР-2 [6]. Поскольку частота выходных импульсов одинакова для обоих каналов, период достаточно измерять только на одном канале. Для получения высокой разрешающей способности при широкой полосе пропускания желательно применение быстродействующего микроконтроллера.

По данным фирмы-изготовителя типовые параметры акселерометров типа ADXLxxx:

- масса инерционного груза -  $0,1 \text{ мкг}$ ;
- емкость дифференциального конденсатора -  $0,1 \text{ пФ}$ ;
- минимальное обнаруживаемое отклонение обкладок конденсатора -  $0,2$  ангстрема;
- изменение емкости соответствующее ускорению -  $0,01 \text{ пФ}$ .

Фирма Analog Devise в настоящее время выпускает следующий ряд интегральных акселерометров: одноосные ADXL105 ( $\pm 5g$ ), ADXL150 ( $\pm 50g$ ), ADXL190 ( $\pm 100g$ ) и двухосные ADXL202 ( $\pm 2g$ ), ADXL210 ( $\pm 10g$ ), ADXL250 ( $\pm 50g$ ).

Среди новинок фирмы хочется отметить двухосевой акселерометр ADXL320 (рис. 3) и очень интересный и перспективный трехосевой ADXL330, его функциональная схема аналогична приведенной на рис. 3, но отличается наличием третьего сигнала.

Это компактные, потребляющие мало энергии приборы с аналоговым выходом по напряжению.

Новейшая линия инерционных датчиков фирмы Analog Devise – это акселерометры со смещенными сигналами ADIS. Акселерометры серии ADIS исключительно удобны в применении при прямом подключении к хост-контроллеру из-за наличия схемы оцифровки сигнала через последовательный интерфейс SPI, через который осуществляется считывание цифрового кода, значение температуры, управление режимами работы акселерометра и его калибровка.

#### Основные параметры ADXL320:

- динамический диапазон -  $\pm 5 g$ ;
- разрешающая способность -  $2 \text{ mg}$ ;
- напряжение питания (однополярное) -  $2,4 \dots 5,25 \text{ В}$ ;
- ток потребления - менее  $350 \text{ мкА}$ ;
- погрешность ортогональности осей X и Y - не более  $\pm 0,1^\circ$ ;
- высокая стабильность нуля и точность коэффициента преобразования;
- полоса устанавливается конденсатором RC цепочки;
- корпус LFCSP  $4 \times 4 \times 1,45 \text{ мм}$ .

#### Основные параметры ADXL330:

- динамический диапазон  $\pm 2$  g;
- напряжение питания (однополярное) - 2,0...3,6В;
- ток потребления - менее 200 мкА;
- высокая стабильность нуля и точность коэффициента преобразования;
- полоса устанавливается конденсатором RC цепочки;
- корпус LFCSP- 4×4×1,45мм.

#### Основные параметры ADIS16201:

- динамический диапазон -  $\pm 1,7$  g;
- напряжение питания (однополярное) - 3,0...3,6В;
- программируется: чувствительность, смещение, частота отсчета, амплитудно-частотная характеристика;
- корпус LGA - 9×9×1,5мм,

Уникальность этого акселерометра состоит в том, что он выдает цифровой код, соответствующий углу наклона, а не просто проекции ускорения силы тяжести на ось чувствительности, как это свойственно обычным акселерометрам. Понятно, что это обеспечивает удобство в применении в МИЙСК и освобождает процессор от пересчета значения ускорения в значение угла.

Очень интересными для промышленных или горных натурных экспериментов может быть акселерометры семейства ХММА фирмы Motorola, состоящие из планарной емкостной ячейки датчика ускорения и КМОП-схемы (КМОП – это начальные буквы четырех слов из полного

определения: комплементарные полевые транзисторы со структурой метал-окисел-полупроводник), нормализации сигнала (рис. 4).

Чувствительный элемент (G-ячейка) сформирована из двух неподвижных пластин, между которыми расположена пластина, закрепленная на упругом подвесе и способная перемещаться под действием инерционных сил. В результате ускорения центральная пластина отклоняется от среднего положения. Расстояние от нее до одной из неподвижных пластин увеличивается на ту же самую величину, на которую расстояние до другой пластины уменьшится. Измеряемое ускорение характеризуется изменением этих расстояний, а пластины G-ячейки представляют собой два переменных противоположно включенных конденсатора. Следует заметить, что подвижная пластина отклонится в направлении противоположном приложенному ускорению. Постоянные ускорения акселерометры ХММА не воспринимают.

Из блок-схемы понятно, что рассогласование емкостей конденсаторов G-ячейки изменяет напряжение на подвижной пластине, которое измеряется электрометрическим усилителем. С выхода электрометрического усилителя полезный сигнал поступает на фильтр нижних частот 4-ого порядка, затем на схему температурной компенсации, которая компенсирует температурный дрейф смещения нуля и чувствительность акселерометра. В акселерометрах типа ХММА также предусмотрено логометрическое включение.

Подразделение фирмы Motorola фирма Freescal Semiconductor также является одним из

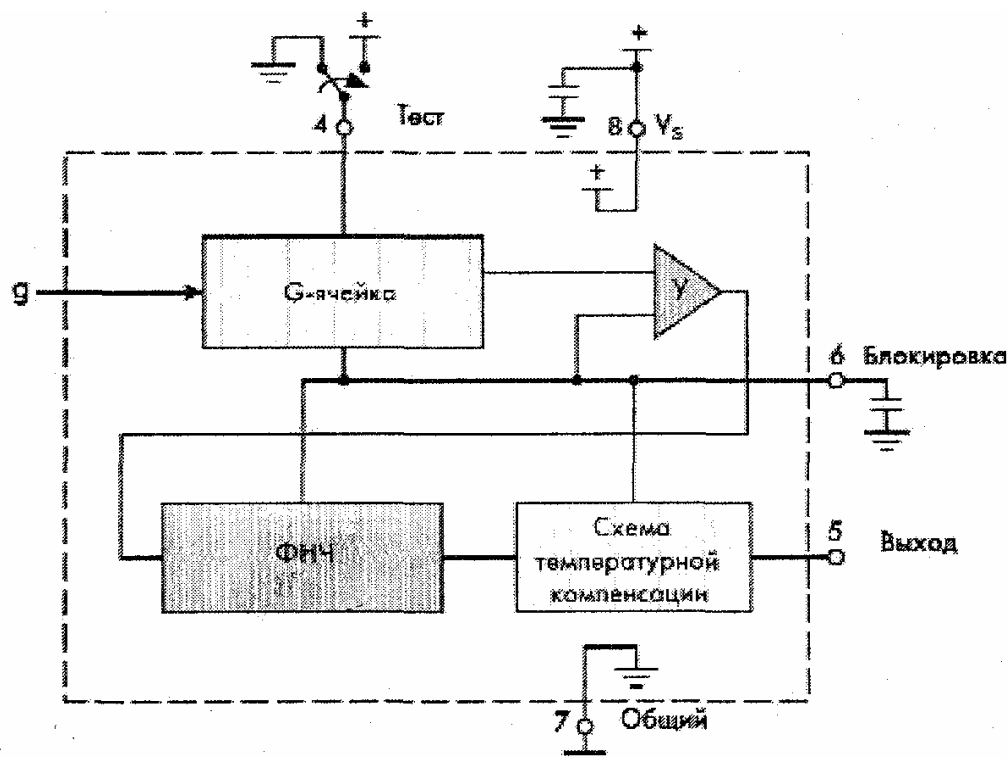


Рисунок 4 — Функциональная схема акселерометра семейства ХММА фирмы Motorola

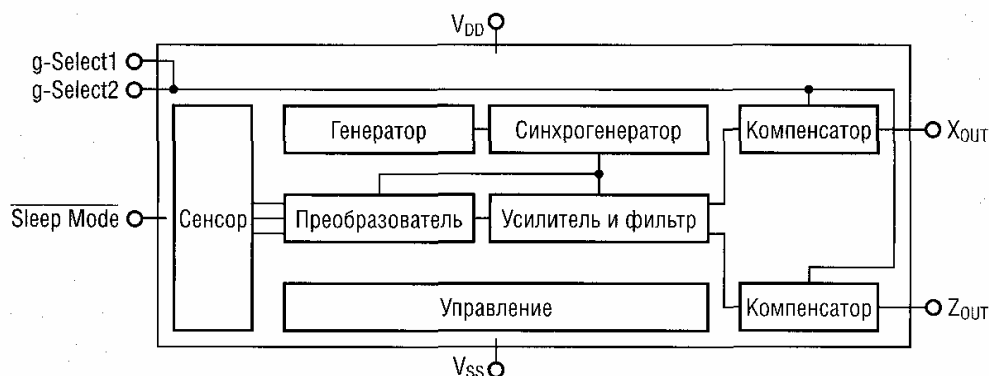


Рисунок 5 — Функциональная схема акселерометра MMA6280Q фирмы Freescale Semiconductor

лидеров в области технологии MEMS. Примером может быть двухосевой акселерометр MMA 6280Q (см. рис. 5), его основные характеристики:

- чувствительность динамического диапазона - 1,5g/2g/4g/6g;
- напряжение питания (однополярное) - 2,2...3,6В;
- ток потребления - менее 500мкА (в режиме ожидания - 3мкА);
- корпус QFN 6×6×1,45мм.

Также очень широко известны на рынке технологии MEMS такие фирмы как ST Microelectronics и MEMSIC. В качестве примера приведем, один из наиболее популярных акселерометров последней из названных фирм – двух осевой MXC6202, его основные характеристики:

- динамический диапазон - ± 2 g;
- чувствительность - 512 LSB/g;
- встроенные средства оцифровки и интерфейса I<sup>2</sup>C;
- автотестирование;
- напряжение питания (однополярное) - 2,7...3,6В;
- ток потребления - менее 2мА;
- корпус LCC - 5×5×1,55мм.

Ассортимент акселерометров технологии MEMS довольно велик и выбор между ними довольно сложен. Поэтому, по нашему мнению, для конкретного МИЙСК или переносного прибора необходимо учитывать много различных параметров, причем эти параметры зачастую нормируются различными фирмами-производителями по-разному.

Следующий вопрос, которому по нашему мнению не уделено достаточно внимания, это методическая погрешность точности установки акселерометра на измеряемом объекте. Например, на летающем объекте в системе обеспечения безопасности и регистрации полетов (для которого он собственно и разрабатывался) МП-95 устанавливается только на специальной юстировочной раме с точностью 30', что обеспечивает полную относительную погрешность системы - менее 2% [4]. Проанализируем погрешность измерений вносимых преобразовательным элементом акселерометра, обуслов-

ленную неточностью установки акселерометра на подъемном сосуде в направлении измеряемого линейного ускорения. Воспользуемся математическим выражением, приведенным в работе [7], при малых углах несовпадения направления установки акселерометра на подъемном сосуде с направлением измерения:

$$\beta_\gamma = 1 - (\cos \gamma + g/a \cdot \sin \gamma),$$

где:  $\beta_\gamma$  – относительная погрешность измерения акселерометра;  $\gamma$  – угол несоответствия установки акселерометра на подъемном сосуде, в градусах;  $a$  – линейное ускорение точки подъемного сосуда, в м/с<sup>2</sup>. Из многолетней практики известно, что максимальные горизонтальные линейные ускорения подъемных сосудов, как правило, не превышают 1,5 g, реальная погрешность установки акселерометра на подъемном сосуде - до 10°. Тогда относительная установочная погрешность акселерометра для этих максимальных ускорений составит 10%. Из приведенного математического выражения видно, что относительная ошибка установки акселерометра уменьшается по мере увеличения линейного ускорения. Как показано в работе [8], для девяностотрехтонного скипа линейное ускорение уже 1,3 м/с<sup>2</sup> ≈ 0,14 g говорит о том, что скип движется с повышенным трением в опасном вибрационном режиме с постоянным контактом по всем направляющим, через предохранительные башмаки в месте сужения проводников. Очевидно, что для фиксации этого аварийного режима требуется чтобы погрешность установки не превышала 7% (точность преобразования штатного датчика МП-95 МИЙСК «МАК-1»), при этом точность установки акселерометра должна быть не хуже 0,5°. А для получения погрешности установки 1%, точность установки акселерометра на подъемном сосуде необходима менее 5 минут. Немаловажное значение имеет также выбор крепления акселерометра на подъемном сосуде. При измерении ударных воздействий могут возникнуть существенные погрешности, связанные с демпфирующим влиянием (это видно из работы [9]). Только абсолютно жесткий вариант крепления корпуса акселерометра (например, сваркой) на компрессоре, редукторе станка-качалки



или подъемном сосуде обеспечивает требуемую точность, не внося дополнительной погрешности.

### **ВЫВОДЫ**

Значительное повышение точности измерений МИИСК линейных ускорений может быть достигнуто путем использования предложенных новых акселерометров, а также путем обеспечения точной и жесткой установки акселерометров в направлении измеряемого линейного ускорения на деталях компрессора, ШСНУ или на подъемном сосуде.

Экономический эффект от использования более современной аппаратуры очевиден.

### **Литература**

1 Копей Б.В., Лопатин В.В., Копей И.Б. Вимірювальні засоби контролю та експрес-діагностики обладнання нафтогазового машинобудування // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – №1(6). – С.129-133.

2 Kopey B.V., Lopatin V.V., Kopey I.B. Transducers for mobile information-measuring systems of mine elevating complexes // Transactions of 3<sup>rd</sup> International Conference “Special Methods of Deposit Utilization”. October 6-7, 2005. – Ostrava, 2005. – pp. 419-423.

3 Копей Б.В., В.В. Лопатин, Копей И.Б. Датчики привязки регистрируемых параметров для мобильных информационно-измерительных систем // Методы и средства технической диагностики: Сб. науч. ст. Вып. XXIII / Марийский гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2006. – С. 59-65.

4 Потенциометрический датчик перегрузок МП-95 (6Л2.775.001 ТО). – М.: Воениздат, 1964. – 16 с.

5 Монолитные акселерометры фирмы Analog Devise // Электронные компоненты и системы. – 1996. – № 5. – С. 16-18

6 Вишницкий А.И., Дудник М.Н., Веретенник В.Н. Рудничный анемометр АПР-2 — прибор нового технического уровня для контроля проветривания шахт // Геотехническая механика: Межвед. науч.-техн. сб. – 2002. – Вып. 38. – С. 180-188.

7 Раевский Н.Н., Субботин М.И. Измерение линейных ускорений. – М.: Изд-во АН СССР – ЦАГИ, 1963. – 68 с.

8 Ильин С.Р., Лопатин В.В. Критерии оценки динамических режимов взаимодействия подъемных сосудов с проводниками жесткой армировки шахтных стволов // Системные технологии: Региональный межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2000. – Вып. 1(9). – С.43-48.

9 Лопатин В.В. Динамика измерительного устройства МП-95 при контроле плавности движения подъемных сосудов шахтных подъемных установок // Вибрации в технике и технологиях. – 1998. – № 3(7). – С. 84-85.

## **II Міжнародна науково-технічна конференція**

# **СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МАШИНО- ЗНАВСТВА**

*м. Луганськ  
(14 – 15 листопада 2007 р.)*

### **Оргкомітет конференції**

*Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля,  
кафедра машинознавства  
91034, м. Луганськ, кв. Молодіжний, 20а*

***mash\_ved@snu.edu.ua***

***Носко Павло Леонідович  
Тел.: (0642) 41 80 28, 41 71 31***

## **Тематика конференції:**

- ☒ **Принципи створення машин, методи розрахунків і конструювання деталей і вузлів машин, удосконалення наявних конструкцій з метою підвищення коефіцієнта корисної дії та зменшення маси машин**
- ☒ **Розвиток теорії та методів синтезу й оптимізації механізмів і машинних агрегатів за заданими умовами роботи**
- ☒ **Вплив матеріалів, технології обробки та умов експлуатації на працездатність, надійність, довговічність машин і механізмів**

## **Мета конференції:**

**Обмін інформацією з теоретичних і прикладних досліджень у галузі оптимального проектування деталей і вузлів машин та механізмів для ефективного вирішення інженерних завдань машинобудування, розробки технологій його удосконалення**